

自愈合水泥在塔里木油田碎屑岩固井中的应用

孙晓杰¹ 余 纲² 瞿志浩¹ 郑会锴¹ 赵宝辉¹ 朱海金¹ 史为纪¹

1. 天津中油渤星工程科技有限公司, 天津 300450;
2. 中国石油塔里木油田公司开发事业部, 新疆 库尔勒 841000

摘 要:塔里木 LN 油田、ST 油田碎屑岩井储层多为中孔、中渗储层,水层多而薄、底水活跃,对层间封固质量要求高,固井过程中易发生油气水窜,水泥环易出现微间隙,后期开采含水率高。自愈合水泥具有自修复功能,并兼具一定的微膨胀效果,能有效防止窜流,改善界面胶结。针对碎屑岩固井难点,结合自愈合水泥特点,研究出一套适用于该区块的自愈合水泥浆体系。该水泥浆体系具有流动性好、抗压强度高、静胶凝过渡时间短等良好的工程性能。室内实验和 4 口井的现场成功应用表明:自愈合水泥浆体系能满足该区块碎屑岩井的固井施工作业,提高固井质量,储层段固井优质率达到 70 % 以上,2 口实验井采油含水率 0 %,为后续老油田稳产增效提供有力保障。

关键词:固井;塔里木油田;碎屑岩;自愈合;微膨胀

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2017.04.011

The Application of Self-Healing Cement in Tarim Clastic Rock Well

Sun Xiaojie¹, Yu Gang², Qu Zhihao¹, Zheng Huikai¹, Zhao Baohui¹, Zhu Haijin¹, Shi Weiji¹

1. Tianjin Boxing Engineering Science and Technology Limited Company of CNPC, Tianjin, 300450, China;
2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract: Generally, clastic rock reservoirs in LN oilfield and ST oilfield in Tarim Basin are of middle porosity and middle permeability, the thin aqueous layers occur frequently and bottom water are active, high quality of zonal isolation is required. In the process of cementing, fluid communication is easy to occur, and micro gaps are easily to appear to cement annulus, also lead to high moisture in the future oil and gas production. Self healing cement has self repairing function, and has a certain micro expansion effect, which can effectively prevent the channeling flow and improve the interfacial bond. Considering the difficulties in clastic rock cementing, combining with the characteristics of self-healing cement, we developed a self-healing cement slurry for this block. The cement slurry has good liquidity, high compressive strength, short transition time in static gelling, and so on. Through the indoor experiment and the successful application to 4 wells, it shows that the self-healing cement slurry system can satisfy the requirements of clastic rocks cementing, significantly improve the cementing quality. The high quality rate of reservoir section is over 70 %, and the rate of water content of two wells is 0 %, which provides a strong

收稿日期:2017-01-19

基金项目:塔里木老区碎屑岩油藏固井技术研究项目(BX-G-16-03)

作者简介:孙晓杰(1986-),男,山东潍坊人,工程师,硕士,主要从事油井水泥外加剂的研究工作。

guarantee for the stability and efficiency exploitation of the old oil field.

Keywords: Well cementing; Tarim oilfield; Clastic rock; Self-healing; Micro-expansion

0 前言

塔里木 LN 油田、ST 油田是塔里木油田的主要产油区之一,该区块主要以碎屑岩井为主,目的层平均孔隙度约 19.4 % ~ 21.7 %,平均渗透率约 $117 \times 10^{-3} \sim 438 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为中孔、中渗储层^[1-3]。经过多年注水开发,储层附近压力紊乱且底水活跃,固井时容易产生渗漏和水窜,导致水泥封隔质量差,后期采油含水率高、产量低,严重影响油田后期生产^[4-6]。自愈合水泥技术是一种智能仿生技术,具有以下特点:油气作用下产生体积膨胀对水泥环微裂缝或微间隙进行封堵,恢复水泥环的水力密封性能;具有弹性水泥的微膨胀性能,有利于改善界面胶结,提高水泥环完整性;提高水泥环内部密实度,降低渗透率。本文结合碎屑岩井固井实际情况以及自愈合水泥的特点,开展了自愈合水泥在碎屑岩固井中的应用研究^[7-9]。

1 自愈合水泥浆性能

1.1 自愈合水泥浆综合性能

根据实验室对自愈合水泥浆体系的前期研究成果以及塔里木碎屑岩固井的实际施工情况,最终确定配方:G 级水泥(100 g) + 自愈合剂 BCY-200 S(5 ~ 10 g) + 降失水剂 BCG-200 L(4 ~ 6 g) + 水(41 g) + G 603(0.1 g),水灰比:0.44。自愈合水泥浆的基本性能见表 1,自愈合水泥浆典型稠化曲线(90℃)、静胶凝曲线(90℃)分别见图 1、2。

表 1 自愈合水泥浆的基本性能

密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	流动度 / cm	游离液 / (%)	失水量 / mL	85℃下 24 h 抗 压强度 /MPa
1.88	21.5	0	28	28

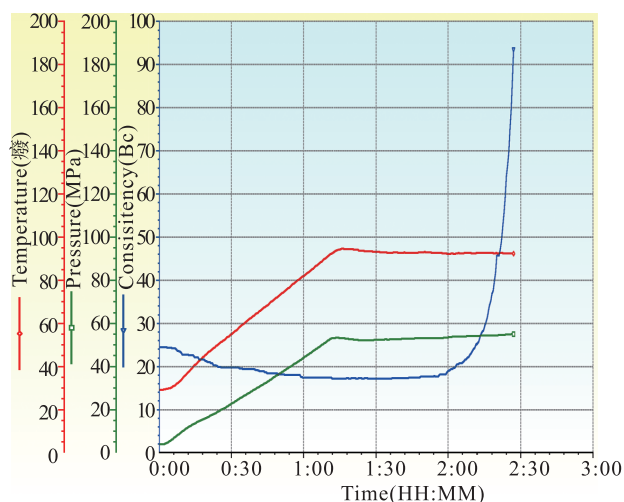


图 1 自愈合水泥浆典型稠化曲线(90℃)

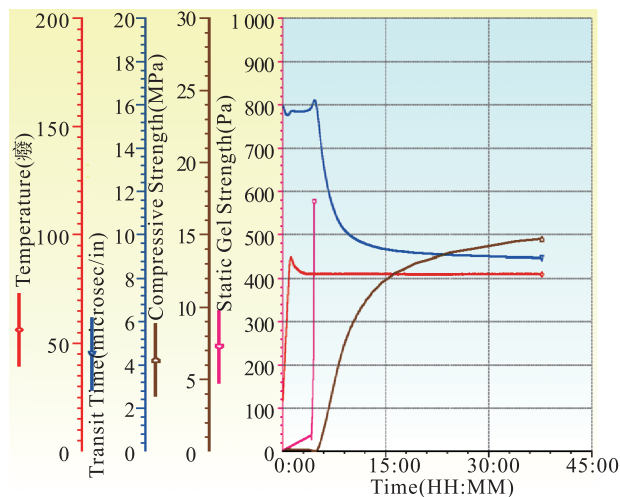


图 2 自愈合水泥浆静胶凝曲线(90℃)

通过图 1 ~ 2 可以看出,稠化曲线平滑,基本接近直角稠化,水泥浆静胶凝过渡时间为 9 min,过渡时间短,具有良好的防窜性能^[10-12]。

同时实验研究了掺有 10 % 自愈合剂的水泥与没掺自愈合剂的水泥的力学性能。通过实验结果可以看出,掺入自愈合剂后,水泥抗压强度和弹性模量均有所降低,泊松比增加,水泥塑性强度增大,表现出弹性水泥的特点,水泥环径向抗变形能力提高,可降低水泥环内压增加时对水泥环造成挤压损伤的风险^[13-16]。自愈合水泥力学性能见表 2。

表 2 自愈合水泥力学性能

岩芯编号	围压 / MPa	破坏强度 / MPa	弹性模量 / GPa	泊松比
1(0 % 自愈合剂)	0	43.16	7.93	0.17
2(10 % 自愈合剂)	0	31.49	5.99	0.19

为了研究自愈合水泥的自修复性能,实验采用三轴力学试验仪在单轴条件下对水泥柱加载,当加载到水泥柱出现宏观裂缝时停止加载,然后再将卸载后的水泥柱放入高压釜内并施加 3 MPa 围压,水泥柱的一端加 2 MPa 的孔压,另一端与大气压相连,测量孔隙流体分别为水和原油时通过水泥柱的流体流量^[17]。实验结果见表 3。

0 % 自愈合剂愈合性能和 5 % 自愈合剂愈合性能分别见图 3、4。从图 3 ~ 4 可以看出,自愈合剂对水没有明显的响应,而轻质原油介质在自愈合水泥中产生渗流时,自愈合剂可以膨胀封堵微裂缝,阻止渗流,5 % 自愈合剂掺量就能有效封堵,渗流持续约 12 min 后停止。

表 3 自愈合水泥渗透特性实验结果

自愈合剂掺量 /(%)	长度 /mm	直径 /mm	重量 /g	密度 /(g·cm ⁻³)	围压 /MPa	孔压 /MPa	流量结果
0	47.08	24.72	43.75	1.94	3	2	无响应
5	48.23	24.82	43.58	1.87	3	2	12 min 停止渗流
10	47.45	24.85	42.01	1.83	3	2	10 min 停止渗流

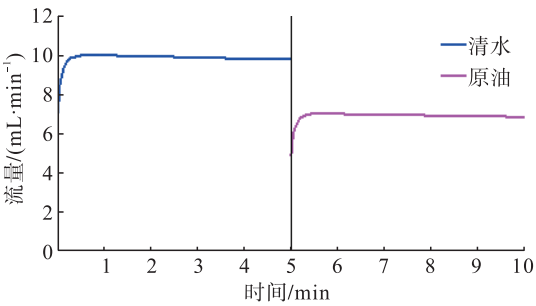


图 3 0 % 自愈合剂愈合性能

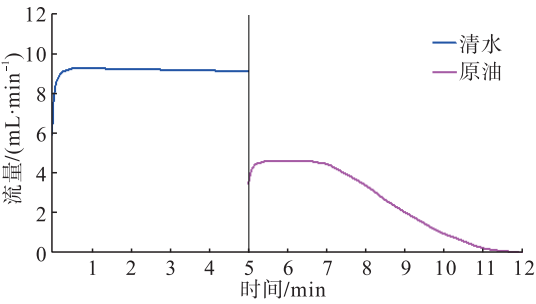


图 4 5 %自愈合剂愈合性能

1.2 自愈合机理

自愈合水泥是在水泥浆中加入自愈合材料,当水泥环产生微裂缝和微间隙时,油气会沿微裂缝或微间隙窜流而激活自愈合材料,自愈合材料的体积发生膨胀,体积膨胀后的自愈合材料可以对微裂缝进行堵塞,由此实现固井水泥环微裂缝的自修复,从而抑制油气窜流^[18-19]。自愈合剂 BCY-200 S 的设计同样是基于此种原理,采用刺激响应型聚合物技术研究,通过在聚合物分子中引入特殊功能基团,优化聚合工艺和结构设计,从而获得刺激响应型聚合物,自愈合剂 BCY-200 S 在遇油气后能有效膨胀,封堵微裂缝,自愈合剂 BCY-200 S 作用机理见图 5^[20]。

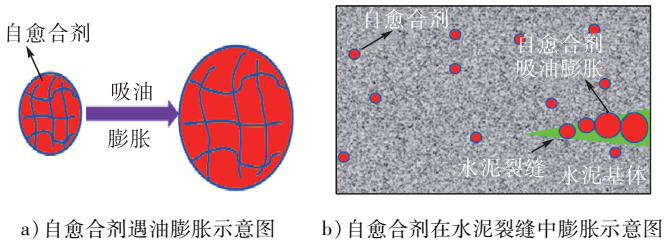


图 5 自愈合剂作用机理

2 现场应用研究

塔里木 LN 油田、ST 油田碎屑岩井一般为二开结构,一开 406.4 mm 钻头钻入 800 m,下入 273.05 mm 套管,二开采用 Φ 241.3 mm 钻头钻至设计井深,下入 Φ 200.03 mm + Φ 139.7 mm 套管进行固井。以往一般采用一次上返方式固井,固井之后,井口时有环空带压现象出现,整体固井质量在储层段的合格率为 53.7 %,优质率为 32.02 %,对油田产量进行统计:LN 油田单井平均产油 7.09 t/d,综合含水率为 72.73 %;ST 油田单井平均产油 3.09 t/d,综合含水率为 89.74 %。

油田碎屑岩井现状的产生原因如下:

1) 储层封隔质量差。由于油田长期注水开发,储层压力紊乱,边水底水活跃,固井无法有效封隔油层水层,后期射孔开采导致含水率高。

2) 环空渗漏。由于地层渗透率、孔隙度偏高,固井易于发生漏失,进而在候凝期间引起环空充填问题,最终形成井下流体窜流通道,造成井口环空带压。

3) 环空微间隙。水泥水化凝固后体积收缩使水泥环与地层和套管间的胶结出现问题,形成微间隙,这种微间隙既影响固井质量又会造成油气资源大量流失。

自愈合水泥特点如下:

1) 提高水泥浆黏滞力,能有效顶替泥浆,提高储层封固质量。

2) 本身具有微膨胀性能,有利于提高水泥环完整性,弥补水泥水化产生的体积收缩,减少环空间隙。

3) 遇油气膨胀,当环空产生油气窜流时,自愈合水泥浆能快速响应,对窜流通道进行有效封堵,降低井口环空带压发生概率。

结合上述自愈合水泥浆特点,在 LN、ST 油田碎屑岩进行 4 口井固井实验,实验结果见表 4。

LNx 1 井是轮南油田轮南某井区一口采油井,采用正注反挤固井工艺施工。尾浆采用自愈合水泥浆体系,封固 4 400 ~ 5 074 m。测井结果显示 4 400 ~ 5 072 m 固井质量良好,胶结优质,储层优质率 70 %,主力油层封隔良好,顶部底部水层均已隔开,试油结果:原油产量 96 m³/d,含水率 0 %,见图 6。

LNx 4 井是轮南油田某井区的一口直井,设计井深

4 910 m。目的层位有两个注水层 T_{12} 和 T_{13} , 位置分别在 4 728 ~ 4 733 m 和 4 755 ~ 4 760 m, 隔层在 4 738 ~ 4 730 m, 隔层较薄, 封固要求高。尾浆密度为 1.88 g/cm^3 , 采用自愈合水泥浆体系, 封固井段 4 310 ~ 4 910 m。测井结果

显示储层优质率 75.7%, 隔层 (4 738 ~ 4 740 m) 固井质量良好, 两水层已经隔开, 达到封固目的。试油结果: 原油产量 $98 \text{ m}^3/\text{d}$, 含水率 0%, 见图 7。

表 4 自愈合水泥浆体系应用情况统计

井号	套管层次	胶结测井结果 (储层段)		同区块井平均胶结测井结果 (储层段)		试油情况
		合格率 / (%)	优质率 / (%)	合格率 / (%)	优质率 / (%)	
LNX 1	二开油套	90.30	70.00	52.50	30.70	产油 $96 \text{ m}^3/\text{d}$, 100% 含油
STX 2 井	二开油套	92.00	75.20	58.00	28.30	产油 $50.76 \text{ m}^3/\text{d}$, 含水 20%, 产气 $165\ 205 \text{ m}^3/\text{d}$
JFX 3	二开油套	90.30	71.20	68.90	52.30	尚未试油
LNX 4	二开油套	90.70	75.70	35.40	16.80	产油 $98.28 \text{ m}^3/\text{d}$, 100% 含油

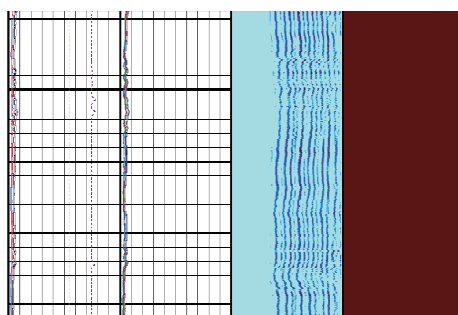


图 6 LNX 1 井固井质量图 (部分)

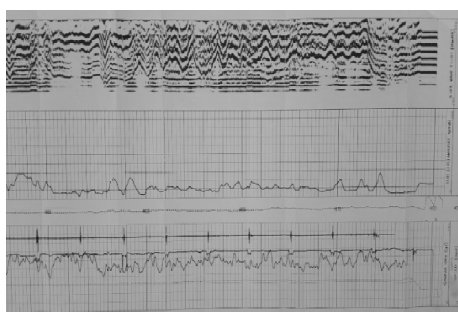


图 7 LNX 4 井固井质量图 (部分)

3 结论

1) 自愈合剂属于多功能智能仿生材料, 在水泥石出现微裂缝时可快速封堵裂缝, 抑制油气窜流, 并且可以改善水泥石变形, 抑制水泥石在外力作用下破碎, 提高水泥石塑性, 保持水泥环完整性。

2) 掺有自愈合剂的水泥浆体系具有良好防窜性能, 并且兼具一定微膨胀性能, 静胶凝过渡时间短, 强度发展快, 综合性能满足现场固井施工要求。

3) 现场应用表明, 自愈合水泥技术能有效解决碎屑岩区块固井时容易产生油气水窜, 以及水泥环产生微间隙等难题, 可有效提高该地区固井质量, 降低采油含水率, 提高采收率, 为油田降本增效提供有力技术支持。

参考文献:

- [1] 贾进华, 申银民. 塔里木盆地东河砂岩段准层序特征及岩相古地理与砂体分布[J]. 石油学报, 2014, 38(2): 135 - 147.
Jia Jinhua, Shen Yinmin. Parasequence Set Division, Lithofacies Paleogeography and Sandbody Distribution of Donghe Sandstone Member in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 38(2): 135 - 147.
- [2] 周新源, 杨海军, 胡剑风, 等. 中国海相油气田勘探实例之十三: 塔里木盆地东河塘海相砂岩油田勘探与发现[J]. 海相油气地质, 2010, 15(1): 73 - 78.
Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Hu Jianfeng, et al. Cases of Discovery and Exploration of Marine Fields in China (Part 13): Donghetang Sandstone Oil Field in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(1): 73 - 78.
- [3] 时志强, 王毅, 金鑫, 等. 塔里木盆地志留系热液碎屑岩储层: 证据、矿物组合及油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 6(35): 903 - 913.
Shi Zhiqiang, Wang Yi, Jin Xin, et al. The Silurian Hydrothermal Clastic Reservoirs in Tarim Basin: Evidences, Mineral Assemblages and Its Petroleum Geological Implications [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 6(35): 903 - 913.
- [4] Takase K, Barhate Y R, Hashimoto H, et al. Cement Sheath Wellbore Integrity for CO_2 Injection and Storage Wells [C] // Paper 127422 was Presented at the SPE Oil & Gas India Conference & Exhibition, 20 - 22 January 2010, Mumbai, India. New York: SPE, 2010.
- [5] 康玉柱. 塔里木盆地油气藏 (田) 特征[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 115 - 120.

- Kang Yuzhu. Some Characteristics of Oil Fields in the Tarim Basin [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 2000, 22 (2): 115 - 120.
- [6] 陈秀艳, 罗平, 贾进华, 等. 塔北中部石炭系东河砂岩物源及沉积体系[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(2): 23 - 30.
- Chen Xiuyan, Luo Ping, Jia Jinhua, et al. Provenances and Sedimentary Facies Distribution in Carboniferous Donghe Sandstone in the Central Part of Northern Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18 (2): 23 - 30.
- [7] 齐志刚, 曹会莲, 曹成章. 提高采收率油井水泥基自修复剂的研制[J]. *钻采工艺*, 2015, 38(1): 95 - 98.
- Qi Zhigang, Cao Huilian, Cao Chengzhang. Development of Oil Well Cement Water-based Self-healing Agent for Eor [J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38 (1): 95 - 98.
- [8] 李早元, 郭小阳, 杨远光. 提高油井水泥环力学形变能力的途径及其作用机理研究[J]. *石油钻探技术*, 2004, 32 (3): 44 - 46.
- Li Zaoyuan, Guo Xiaoyang, Yang Yuanguang. The Methods and the Mechanisms of Improving Deformation Capability of Cement Stone [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2004, 32 (3): 44 - 46.
- [9] Reinhardt H W, Jooss M. Permeability and Self-healing of Cracked Concrete as A Function of Temperature and Crack Width [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33 (7): 981 - 985.
- [10] 杨振杰, 齐斌, 刘阿妮, 等. 水泥基材料微裂缝自修复机理研究进展[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(3): 124 - 128.
- Yang Zhenjie, Qi Bin, Liu Ani, et al. Research on Mechanisms of Crack Self-healing in Cement Matrix [J]. *Drilling Petroleum Techniques*, 2009, 37 (3): 124 - 128.
- [11] 李小可, 雷鑫宇, 陈大钧. 油井水泥复合型自愈合剂的研制和评价[J]. *科学技术与工程*, 2013, 28 (13): 8419 - 8423.
- Li Xiaoke, Lei Xinyu, Chen Dajun, et al. The Development and Evaluation of the Oil Well Cement Composite Self Healing Agent [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 28 (13): 8419 - 8423.
- [12] 刘承超. 自修复混凝土的工作机理及试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
- Liu Chengchao. Functional Mechanism and Experimental Research of Self-repairing Concrete [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [13] Gagné R, Argouges M. A Study of The Natural Self-Healing of Mortars Using Air-Flow Measurements [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45 (11): 1625 - 1638.
- [14] Kessle M R, Sottos N R, White S R. Self-healing Structural Composite Materials [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34 (8): 743 - 753.
- [15] 刘萌, 李明, 刘小利, 等. 固井自修复水泥浆技术难点分析与对策[J]. *钻采工艺*, 2015, 38(2): 27 - 30.
- Liu Meng, Li Ming, Liu Xiaoli, et al. Technical Difficulties and Countermeasures of Self-Healing Cement Slurry [J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38 (2): 27 - 30.
- [16] 黄祥锋, 张光明, 曹畅, 等. 水泥环性质对套管强度影响的有限元分析[J]. *天然气与石油*, 2012, 30(4): 50 - 54.
- Huang Xiangfeng, Zhang Guangming, Cao Chang, et al. Finite Element Analysis on Effect of Cement Sheath Property on Casing Strength [J]. *Natural Gas and Oil*, 2012, 30 (4): 50 - 54.
- [17] 杨振杰, 朱海涛, 王嘉淮, 等. 天然气井套间气窜自修复技术[J]. *天然气工业*, 2012, 32(10): 55 - 58.
- Yang Zhenjie, Zhu Haitao, Wang Jiahuai, et al. On Self-healing Technology for Gas Channeling in the Cemented Annulus [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32 (10): 55 - 58.
- [18] Reddy B, Liang F, Fitzgerald R. Self-healing Cements that Heal without Dependence on Fluid Contact [J]. Paper 121555 - MS was Presented on the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 20 - 22 April 2009, The Woodlands, Texas, USA. New York: SPE, 2009.
- [19] Qiu J, Ven M F C, Wu S, et al. Investigating the Self Healing Capability of Bituminous Binder [J]. *Road Materials & Pavement Design*, 2009, 10 (suppl 1): 81 - 94.
- [20] 杨振杰, 齐斌, 刘阿妮, 等. 水泥基材料微裂缝自修复机理研究进展[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(3): 124 - 128.
- Yang Zhenjie, Qi Bin, Liu Ani, et al. Research on Mechanisms of Crack Self-healing in Cement Matrix [J]. *Drilling Petroleum Techniques*, 2009, 37 (3): 124 - 128.